

# 荒天中の自動操舵と Yawing について

正員 工学士 元 良 誠 三

## Abstract

On the Automatic Sheering, and Yawing of Ships in Rough Seas

By Seizo Motora, *Kogakushi, Member*

According to the records of actual ship experiment on S. S. Nisseimaru in the North Pacific Ocean last, year steering angle in automatic steering condition often exceeds 20 degrees in heavy storm, and the loss of amount of horsepower due to this excessive steering cannot be overlooked.

The steering angle in the above condition exceeds the amount necessary to hold the ship's course straight, and even causes the ship to yaw beyond the natural yawing by waves.

The author investigates in this paper into the relationship between steering angle and her condition, and finds, there is relationship between excessive steering angle and relative wind direction, and notes that the phase lag in steering due to "weather adjust" is one of the important causes of excessive steering and yawing.

## 目 次

§ 1. 緒 論	3-2 舵の抵抗
§ 2. 操舵角度と海象の関係	§ 4. 大角度操舵の原因
2-1 波による Yawing	4-1 weather adjust と位相差
2-2 操舵角度と風向との関係	4-2 偏角と舵角の位相差が航路安定性に及ぼす影響
2-3 操舵角度と風速との関係	4-3 過大操舵防止に対する一方法
§ 3. 操舵の為の馬力損失	
3-1 蛇行遠心力による抵抗増加	

## § 1. 緒 論

昨年行われた日聖丸による実船試験の記録によると、荒天中の操舵角度は自動操舵中で 20 度を超える事があり、この角度は我々の予想をかなり上廻るものであつた。

船の方位角と、之に対応する操舵角とを代表的な数例について示すと第 1 図の如くである。第 1 図の短週期(約 7 秒)の Yawing は、一波毎に波圧によつて生じた Yawing であり、其振巾も大体理論的に予想される量と一致して居り、又週期も波の出会週期と一致している。

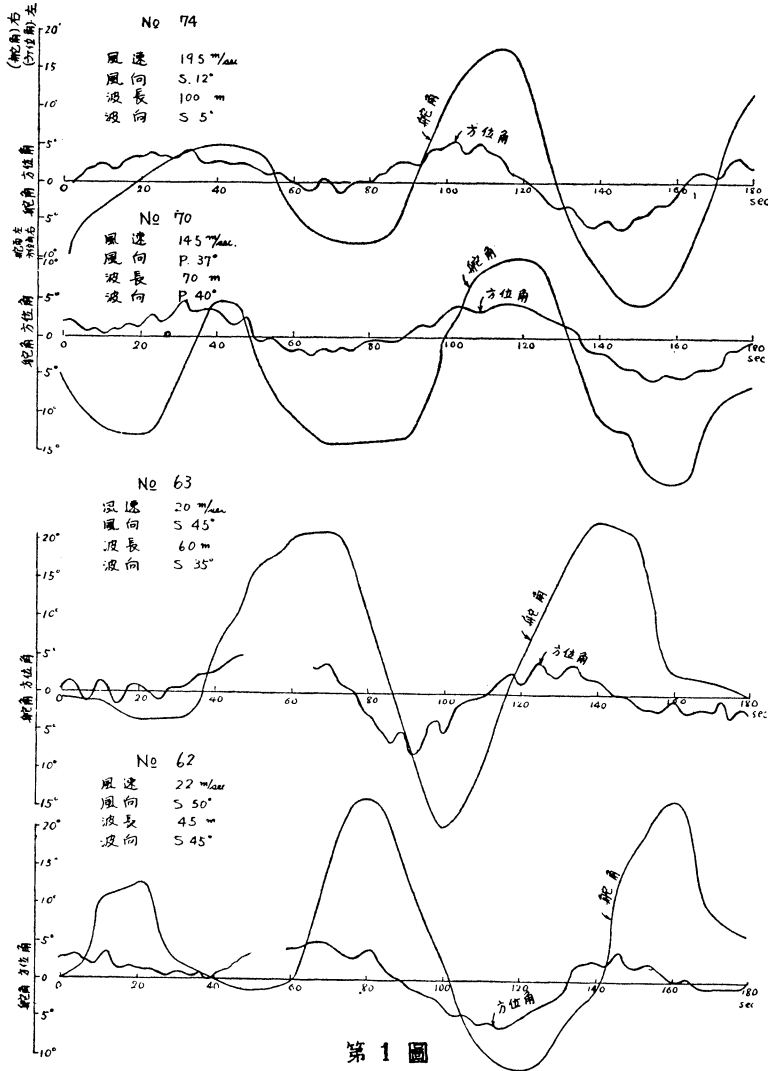
この他に長週期(約 70 秒)の大角度の Yawing と云うより蛇航が之に重つているのが見られる。そしてこれと同じ週期で大角度の操舵が行われている。この様な長週期の週期的な外力は考えられないから、後者は操舵によつて生じた蛇航であり、その週期は自動操縦装置のサーボ機構に於ける固有週期であると思われる。

この事から自動操舵の角度は船の航路を保つ目的を超えて居り、或場合にはこの操舵の為に不必要な蛇航を生じて居るのではないかの疑問を生じて来る。

本論文では、この大角度の操舵と、その時の海象状態の関連と、その為に生ずる馬力損失につき調査し、更に何故にこの様な大角度の操舵を起すかの原因を考慮した。

## § 2. 操舵角度と海象の関係

第 1 表は横浜出航より Vancouver を経て Honolulu 迄の各実験番号<sup>2)</sup>に於ける舵角, Yawing, 及び海象



第1圖

状態を示すもので、表中、平均舵角とは左右両方の舵角を全部符号を等しくして平均したものであり、平均抵抗とは、左右別々の平均の差である。(第1図参照) 従つて前者は大体舵角の変動を示し、操舵の為の抵抗の増加は、略々この平均舵角に比例する。

又後者は平均して舵がどちらの舷に片寄つて居たかを示すもので、船を航路より外れさせようとする外力の偶力に略々比例するものと考えられる。(頁数の関係で第1表省略)

2.1. 波による Yawing

波による一波毎の Yawing は例えば第1図 No. 74 では約 1.5° 程度である。

波浪中の強制偶力は論文<sup>1)</sup>によつて計算すると、

$$\begin{aligned} \text{迎角 } \alpha &= 5^\circ \\ \text{波長} &= 100 \text{ m} \\ \text{波長/船長} &= 0.78 \\ \text{波高/波長} &= 1/20 \end{aligned}$$

に対し 偶力  $N=0.02 W \cdot L$

但し  $W$ ・船の排水量  
 $L$ ・船の長さ

之より Yawing に対する

抵抗を無視して Yawing の振巾を求めると、

$$\theta = \frac{N}{\left(\frac{2\pi}{\tau}\right)^2} \times \frac{1}{I}$$

但し  $I$ ・船の垂直軸の囲りの慣動半径

$\tau$ ・出会週期

この式に数値を入れて略算すると  $\theta = 1.5^\circ$

を得る。従つて波によつて生ずる Yawing の量は理論的に予想される程度であり、又この為著しく推進性能が害される事はない。

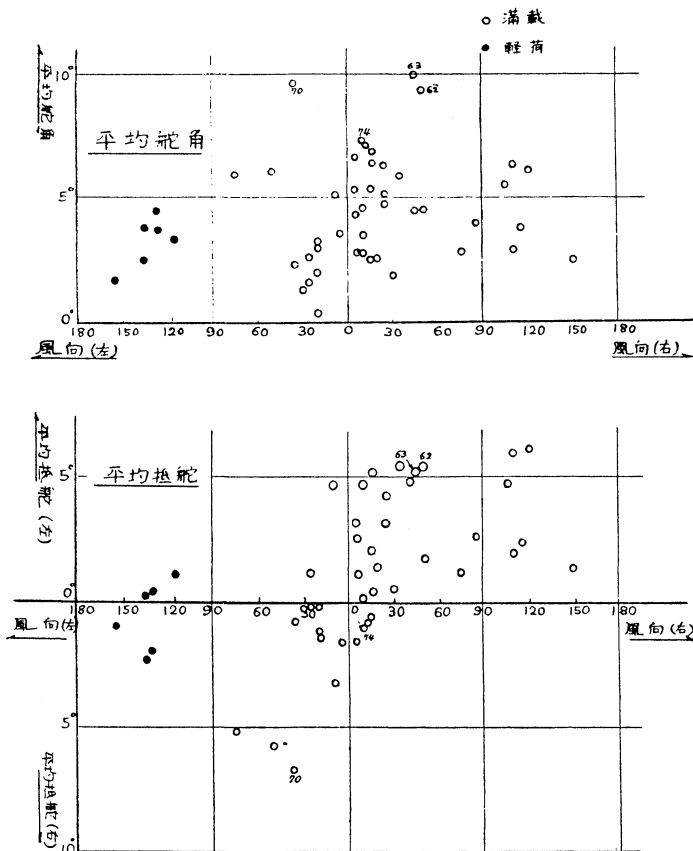
2.2. 操舵角度と風向との関係

第1表より操舵角度と風向との関係を plot すると第2図の如くなる。図中黒丸は往航軽荷状態を示し、白丸は復航満載状態を示す。

第2図を見ると平均舵角の方は風向によつて大した変化はないが、平均抵抗の方は明瞭に風が左舷から吹く時と右舷から吹く時とで方向が逆になつている。

この傾向は満載時によく現われ、舵は常に風の吹いて居る舷の側へ抵舵されている。これは中島氏の論文<sup>3)</sup>に述べられている如く、風が船体に及ぼす力と、船体が drift する為水から受ける水圧力の作る偶力がこの場合は

平均舵角及び平均抵抗と風向の関係



第 2 圖

尙この平均抵抗に相当する舵角を定常的に取った時に生ずる偶力が風の偶力に等しいと考えて第 1 図の数例について計算して見ると第 2 表の様になる。

2.3. 風速との関係

第 2 図は風速の大小を考慮せずに plot したものであるが、若しこの舵角の変動が風の為に生じたものとするれば風圧力は風速の二乗に比例するから、平均舵角、平均抵抗を風速の二乗で割れば第 2 図の点は多小纏つて来る事が考えられる。

第 4 図はその結果を示す。第 2 図に対しさして纏まつたとは云えないが、第 2 図では真正面の風に対して舵角の変動及び抵抗が大きく出て居るのに対し第 4 図ではむしろ 90° 附近の風向の時が大きくなっている。

これは偶々 Vancouver より横浜に向う間に正面近くの強風を受けた日が続いた為であつて、操縦性の見地からは真横の強風を受けた時の方が不利である事を示す。

§ 3. 操舵の為の馬力損失

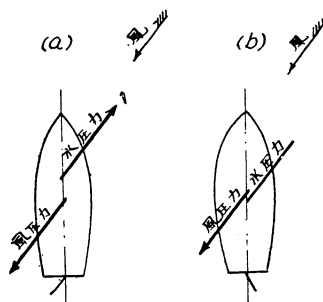
20° を超える操舵を行えば、その為の馬力の損失も決して小さくない事が考えられる。操舵及びその為の舵航の為の馬力損失の原因として次のものが考えられる。

1. 遠心力の分力
2. 舵の抵抗
3. 斜航の為の抵抗
4. 走行距離の延長
5. 操舵機の馬力損失

船を風上側に立てようとする方向に働く事を示す。(第 3 図 (a) 参照) この事は日聖丸の船橋が比較的船体中央に近く、且垂直な壁面を有する事からも予想される事である。

軽荷時は data が少く、はつきりした事は判らないが、満載の時とは逆にやや風下に落ちる傾向を示している。これは軽荷時に大きな船尾トリムをつける為に、水圧中心が後方へ寄り、偶力が逆となるものと考えられる。

船の航路を保つ上から云うと、満載時の如く風に立つ方が望ましい。即ち風圧力による船の drift が幾分でも舵の力によつて阻止されるからである。

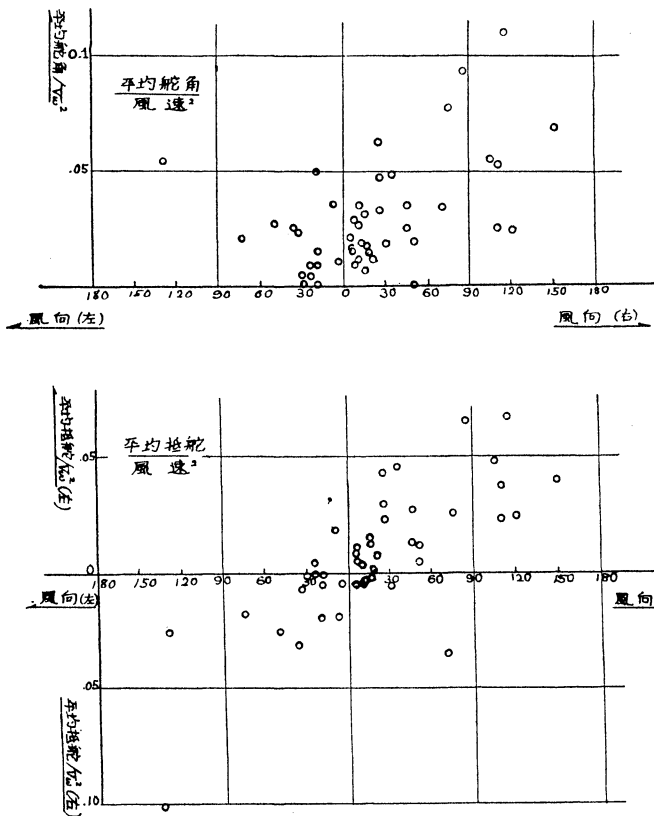


第 3 圖

第 2 表

実験 No.	船速	平均抵抗	偶力
62	9.95 kts	5.35°	742 t-m
63	8.65	5.48	760
74	8.73	0.36	70.4

風速及び風向と舵角の關係



第4圖

この結果を見ると操舵の為の馬力損失は看過出来ぬものがある。勿論この操舵の為の馬力損失を全く無くする事は出来ないが、平均抵舵の附近で ±5° 程度の変動に押えられれば蛇航も少なくなり馬力損失も格段に減少するであろう。

次にこの様な大角度の操舵の原因は何処にあるか、又不可避なものであるかどうかについて考察して見たい。

#### §4. 大角度操舵の原因

##### 4.1. Weather adjust と位相差

第1図を見ると、船の方位角の変動に対し舵角の変動は常に5~10秒程度遅れて起つて居るのが判る。この遅れは航路保持の為に有害である事は Minorsky<sup>4)</sup> が指摘して居る通りである。

以下この位相差を生ずる原因を考えて見る。

現在用いられている自動操舵の方式は、船の予定コースよりの偏り角に比例して舵角を取る方式である。

偏角は gyrocompass によつて検出され、偏角を生ずるや否や電気接点に接触して操舵が初り、操舵角と共に接点が移動して偏角に比例した舵角迄動いて静止する。静水中ではこの電気接点には殆んど間隙が無く、舵は鋭敏に偏角に応じて取られるが、荒天中では波の為に Yawing を生じて、偏角は週期的に変動し、特に迎波の

この内、3, 4, はかなりの蛇航をしない限り大して抵抗増加にならない事は論文<sup>2)</sup> に述べた通りで、ここでは無視し、5も余り大きくないと考えられるので省略する。

##### 3.1. 蛇航遠心力による抵抗増加

第1図の例につき附録1に示す様な方法で計算して見ると第3表の如くなる。

第3表

実験 No.	蛇航振幅	週 期	$\eta R$ 平均抵抗
62	6°	70 sec	3.23 t
63	5°	//	2.25 t
74	5°	//	2.25 t

##### 3.2. 舵の抵抗

舵角の変動による舵自体の抵抗を平均したものを附録2の如き方法で求めて見ると第4表の様になる。

第4表

実験 No.	平均抵抗 $\bar{R}_r$
62	2.25 t
63	2.59
74	1.33

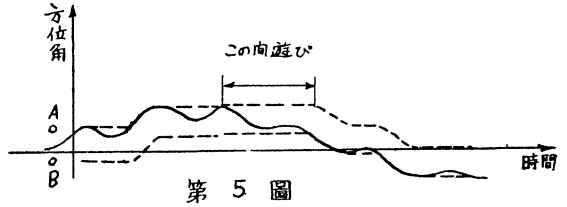
両者を加えて操舵の為の抵抗増加及び馬力の損失を求めて見ると、第5表の様になる。

第5表

No.	$\bar{R}_y + \bar{R}_r$	船 速	馬力損失	EHP と の 比	
				$\eta=0.6$	$\eta=0.5$
62	5.48 t	5.12 m/sec	375 HP	19.7%	23.7%
63	4.84	4.46	288	14.8	17.8
74	3.58	4.48	214	10.5	12.6

状態では出会週期が短く、変動が激しいので、それに忠実に対応して舵角を取る事は操舵器の故障の原因となるので所謂 weather adjust を行う。

現在行われている weather adjust の方法は、二個の電気接点の間に或程度の間隙を明けて置くやり方で、之により短週期の細かい Yawing は一々舵角に伝達されず、その外側を連ねる線が伝達されるわけである。若し Yawing の振巾が一定して、接点間隔が丁度その振巾と等しい場合には舵角は方位角の平均線に比例して取られ位相差を生じないが、Yawing が不規則であり、且接点間隔が大きい場合には第5図の如く舵角には多少の遅れを伴つて伝達される。



第5図

今この位相差と接点間隔との関係を考えて見ると、

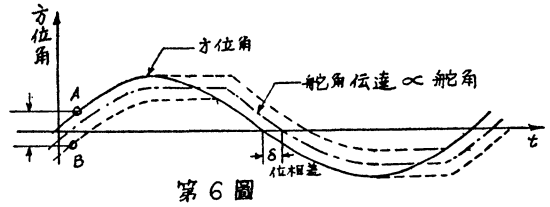
第6図に於て、接点間隔を  $2s$  とし、一つの接点をA、他をB、中間をCとすると、結局中間点Cが舵角に伝達されるわけであるが、偏角が例えば左に動いて最大に達し、右に転ずる際に  $2s$  の遊びを生ずるので、結局  $\delta$  だけの位相差を生じ、

$$\delta = S / \left( \frac{d\theta}{dt} \right)_{\max}$$

Yawing の振巾を  $\Theta$ 、週期を  $\tau$  とすると、  $\delta = \frac{\tau S}{2\pi \Theta}$

例えば  $\Theta = 5^\circ$   $s = 2^\circ$   $\tau = 70 \text{ sec}$  とすると、  $\delta = 4.6 \text{ sec}$

この外にも位相差を生ずる原因があるかも知れないが、これが主要な原因となつているものと思われる。



第6図

4.2. 偏角と舵角の位相差が航路安定性に及ぼす影響

第7図に於て、船体に固定して  $x'o'y$  軸を取る。

- 船の中心線が  $\xi$  軸と為す角、  $\theta$
- 前進速度  $u + \Delta u$
- 漂流速度  $v + \Delta v$
- 回転角速度  $w + \Delta w$
- y 方向の外力を  $Y$
- 回転偶力を  $N$

前進速度は不変なものとして即ち  $\Delta u = 0$  として運動方程式を作ると、論文<sup>5)</sup>に求められて居る如く

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta v}{dt} &= \mu_2 \Delta v + \mu_3 \Delta w + Y \\ \frac{d\Delta w}{dt} &= \nu_2 \Delta v + \nu_3 \Delta w + N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

但し  $\mu_2, \mu_3, \nu_2, \nu_3$  は船型及び前進速度によつて変化する係数である。

今舵角を  $\theta$  に比例して取るとして比例係数を  $c$  とすると、

$$\left\{ \begin{aligned} N &= -k_\theta \cdot \alpha & \alpha (\text{舵角}) &= c\theta \quad \text{故} & \left\{ \begin{aligned} N &= -k_\theta \cdot c \cdot \Delta\theta \\ Y &= k_y \cdot c \cdot \Delta\theta \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

(1) 式に代入すると、

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Delta v}{dt} &= \mu_2 \Delta v + \mu_3 \Delta w + k_y c \Delta\theta \\ \frac{d\Delta w}{dt} &= \nu_2 \Delta v + \nu_3 \Delta w - k_\theta c \Delta\theta \end{aligned} \right. \quad (3)$$

之より  $4v$  を消去すると  $4w = -\frac{d^2\theta}{dt^2}$  なる事を考えて

$$\frac{d^3\Delta\theta}{dt^3} + q_1 \frac{d^2\Delta\theta}{dt^2} + (q_2 + k_\theta c) \frac{d\Delta\theta}{dt} + (-\mu_2 k_\theta c - \nu_2 k_y \cdot c) \Delta\theta = 0 \quad (4)$$

$$\text{但し } q_1 = -(\mu_2 + \nu_3) \quad q_2 = (\mu_2 \nu_3 - \nu_2 \mu_3)$$

この  $\Delta\theta$  の安定条件は

$$\begin{cases} q_1 > 0 \\ q_1(q_2 + k_\theta \cdot c) + (\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c) > 0 \\ -(\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

この条件が満たされれば船は何等かの外力により原航路より外れても又元の方角へ戻るわけである。次に前述の理由で方位角  $\theta$  と舵角  $\alpha$  との間に  $\delta$  なる時間の遅れがある場合には Minorsky<sup>4)</sup> が取扱つた様に

$$\alpha = c\theta(t) \quad \text{が} \quad \alpha = c\theta(t - \delta) \quad (6)$$

となるから

$$\begin{cases} N = -k_\theta c \cdot \theta(t - \delta) = -\left(k_\theta \cdot c - k_\theta c \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \delta\right) \\ Y = k_y c \cdot \theta(t - \delta) = k_y c \theta - k_y c \frac{d\theta}{dt} \delta \end{cases} \quad (7)$$

従つて (4) 式第三項の係数は

$$q_2 + k_\theta \cdot c + (\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c) \delta \quad \text{となる。} \quad (8)$$

従つて安定判別式 (5) は

$$\begin{cases} q_1 > 0 \\ q_1(q_2 + k_\theta \cdot c) + (\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c)(q_1 \delta + 1) > 0 \\ -(\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c) > 0 \end{cases} \quad (9)$$

となる。即ち判別式第二式に新たに  $(\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c) q_1 \delta$  なる項が加わるわけである。

然るに第3式より安定なる船 (操舵方向が偏角と逆方向になつている船) では  $(\mu_2 k_\theta \cdot c + \nu_2 k_y \cdot c)$  は負であるから位相差  $\delta$  ( $\delta > 0$  が遅れ) は安定性に不利な影響を与える事になる。

今例について計算して見ると、論文<sup>5)</sup> より日聖丸に大体相当した数値を取つて来ると

$$k_\theta = 0.583 \quad k_y = 0.0697 \quad c = 3 \text{ (第1図より取る)} \quad \mu_2 = -3.02 \quad \nu_2 = -6.152 \quad q_1 = 4.04 \quad q_2 = 2.013$$

之を用いると

1) 遅れの無い場合、安定判別式 (5) は

$$\begin{cases} \text{第一式} & q_1 = 4.04 > 0 \\ \text{第二式} & 15.20 - 6.57 = 8.63 > 0 \\ \text{第三式} & 6.57 > 0 \end{cases} \quad \text{となり安定である。}$$

2) 次に10秒の遅れがあつたとすると、1) 式の係数は総て船の長さにつき相似な係数で表わされているから

$$\delta = 10/\sqrt{L} = 10/\sqrt{128} = 0.883$$

之を安定判別式 (9) に入れると

$$\begin{cases} \text{第一式} & 4.04 > 0 \\ \text{第二式} & 15.20 - 6.57(1 + 4.04\delta) = -14.80 < 0 \\ \text{第三式} & 6.57 > 0 \end{cases}$$

となつて遅れの為に不安定となる。

尚どの程度の遅れがあると不安定になるかを求めて見ると  $\delta = 3.7 \text{ sec}$  となる。

この事から、荒天時迎波の状態では weather adjust の為に舵角の伝達に遅れを生ずる結果船は方向的に不安定に陥り、偶々強風による偶力で船が航路より外されようとして大角度の操舵を誘起するものと思われる。

往航時、かなりの荒天にも拘らず大して舵角が大きくなり、又長週期の蛇航を生じていないのは、追波の為出会週期が長いので weather adjust をしていない為と考えられる。尙蛇航の週期は皆大体 70 sec 位であるが、之は操舵系の固有週期であろう。

#### 4.3. 過大操舵防止に対する一方法

以上述べて来た如く、大角度の操舵の原因が主として weather adjust による位相差による事が判つたので、揺れを生じない様な調節方法があれば理想的なわけである。

その一つの方法としてはダイロコムパスで検出された偏角を直ちに舵角に伝えないで、途中に電氣的、或は機械的に filter を入れて、或程度以下（例えば 10 秒）の短週期的変動を除いて定常的か又は極めて長週期的変動を伝える様にする方法がある。

機械的にはスプリングと damper により、電氣的にはコンデンサーとチョークによつて比較的容易に目的が達せられるのではなからうか。

それと同時に舵角は或程度（例えば 10°）で押えて、それ以上は取らない様にするのも有効であろう。

第 2 図から見られる様に平均抵舵は大体 6° 止りであるから、風による偶力の平均は最大この程度の舵角で押えられる事を意味する。従つて 20° 或はそれ以上の舵角を要する様な強制外力はあり得ないわけで、風の偶力を十分押えるに足る舵角を限度として押える事は必要である。

尚この様な風の偶力の最大値は、木下、中島氏の行つた実験<sup>3)</sup> 即ち各状態に於ける船体の水線上及水線下の風圧中心及び抵抗係数を種々の迎角につき求める事により推定出来る。

### 附録 1. 蛇航遠心力による抵抗増加

蛇航の最大角速度を  $w$  とすれば

遠心力の船体中心線方向の分力は<sup>5)</sup> より

$$(m+m_y)lw^2 \quad \text{但し} \begin{cases} m \cdot \text{船の質量} \\ m_y \cdot \text{船の横方向の見掛質量} \\ l \cdot \text{転軸より重心迄の距離} = \frac{L}{4} \sim \frac{L}{7} \end{cases}$$

之が週期的に働くから平均として

$$\bar{R} = \frac{2}{\pi} (m+m_y)lw^2$$

$$l = 21.3 \text{ m}$$

$$m_y \approx m$$

$$m+m_y = \frac{2W}{g} \quad W = 13,500 \text{ t}$$

$$w = \frac{2\pi}{\tau} \theta_y$$

として計算すると

No.	$\theta_y$	$\tau$	$w$	$\bar{R}$
62	6°	70 sec	.00938	3.23 t-m
63	5°	//	.00783	2.25
74	5°	//	//	2.25

### 附録 2. 舵 の 抵 抗

a) 推進器直後の舵の抵抗については今の処殆んど資料が無い。唯 Bottomley<sup>6)</sup> が舵の船後影響の実験を行っているのでその data を参照すると、

舵角 15° で

伴流影響（直圧力の比）	推進器流影響（//）	合影響
0.40	2.40	0.97

之より見て伴流の為 open の時の半分以下に下つた直圧力が推進器後流の為に又元の程度にするわけである。之より見て舵の大部分は推進器後流中にあつて、その流速を受けると考えられる。

今の場合は推進器が略々全速時と同程度に廻りつつ速度が低下している場合であるから一層後流影響が顕著に現われるわけである。

今艀の面積の90%は推進器後流の中に没しそれ以外は伴流中にあるとすると

船速  $V$

伴流率  $w$

推進器後流  $V_p = V_{p0} \times \frac{n}{n_0}$

艀の或角度に於ける抵抗係数を  $C_D$  とすると

$$R_r = \frac{1}{2} \rho A C_D \left\{ 0.9 \times V_{p0}^2 \times \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 + 0.1 V^2 (1-w)^2 \right\}$$

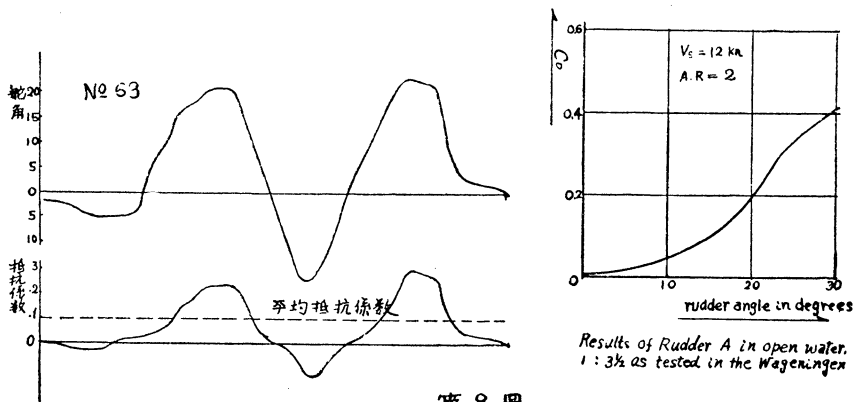
で大体算出し得る。

b) 次に抵抗係数は艀角が変動するのでその平均を取るわけであるが、艀角と  $C_D$  は比例しないので第8図の如く変動する各艀角に対する  $C_D$  の値を8図a)の実験値より取り  $C_D$  の曲線を作り、その面積を測つて平均を取る。かくして得られた  $\bar{C}_D$  の値を用いて代表的な数例について計算して見ると、

$w=0.25$     $n_0=99$     $V_{p0}=6.83$  m/sec.    $A=15.9$  m<sup>2</sup>

等の数値より下表の如くなる。

No.	$V$	$V_p$	$n$	$\bar{C}_D$	$R_r$
62	5.12	6.18	89.4	0.074	2.25 t
63	4.46	6.03	87.2	0.0922	2.59 t
74	4.48	6.02	87.1	0.0494	1.33 t



第8図

参考文献

- 1) 元良誠三：強制外力による船首揺れについて，造船協会々報 83 号。
- 2) 菅四郎外：日聖丸航海実測試験について，昭 27. 11 造船協会講演会にて発表。
- 3) 中島康吉：鉄道連絡船の操縦性に及ぼす風の影響，造船協会論文集 84 号。
- 4) Directional Stability of Automatically Steered Body. Minorsky, N., TSNA, 1922.
- 5) 元良誠三：航路安定性について，昭 21. 11 造船協会講演会にて発表
- 6) Manoeuvring of Ships part I, part II Baker G. S., & Bottomley G. H. I. E. & S. Scotld. 1921~1922.